



INOVASI BIOREMEDIASI DALAM MENGATASI PENCEMARAN LINGKUNGAN: *SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW*

St. Fatima Kadir¹, Nurul Afifah Ahqaf², Yusminah Hala^{3*}
^{1,2,3}Universitas Negeri Makassar
e-mail: yushala12@gmail.com

Diterima: 16/03/2026; Direvisi: 26/ 03/2026; Diterbitkan: 21/04/2026

ABSTRAK

Peningkatan pencemaran lingkungan global oleh hidrokarbon, logam berat, dan polutan baru menuntut solusi pemulihan yang berkelanjutan mengingat keterbatasan metode fisik dan kimia konvensional. Bioremediasi hadir sebagai alternatif ramah lingkungan, tetapi temuan inovasi terbarunya masih terfragmentasi dalam berbagai literatur tanpa adanya kajian komprehensif yang mengevaluasi efektivitas gabungan teknologi tersebut. Penelitian ini merupakan *Systematic Literature Review* (SLR) yang bertujuan untuk memetakan perkembangan inovasi bioremediasi terkini dan mengevaluasi efektivitas gabungan (hibridisasi) teknologinya. Metode penelitian mengadopsi protokol PRISMA dengan menelusuri pangkalan data Scopus (rentang tahun 2020–2026) yang secara sistematis menyaring dan menghasilkan 18 artikel jurnal relevan untuk dianalisis secara tematik. Hasil sintesis literatur menunjukkan adanya pergeseran paradigma bioremediasi dari pendekatan konvensional yang cenderung mengandalkan agen biologis tunggal dan proses yang terpisah, menuju pendekatan terintegrasi berbasis sistem hibrida yang mengombinasikan mikroba indigen, strategi peningkatan bioavailabilitas, serta teknologi rekayasa modern. Pergeseran ini tercermin dalam empat temuan utama, yaitu: (1) eksplorasi galur mikrobioma lokal (indigen), (2) pemanfaatan agen pemicu ketersediaan polutan (*bioavailabilitas*) seperti biosurfaktan dan *quorum-sensing*, (3) hibridisasi sistem biologis dengan rekayasa modern (seperti modifikasi genom CRISPR-Cas9 dan Sistem Bioelektrokimia Mikroba), serta (4) identifikasi tantangan implementasi dan kesenjangan adopsi teknologi di tingkat lokal. Kesimpulan penelitian ini menegaskan bahwa integrasi keempat inovasi mutakhir tersebut menjadikan bioremediasi sebagai salah satu intervensi yang adaptif, efisien, dan berkelanjutan dalam pemulihan ekosistem, sehingga mampu mencegah kerusakan ekologi jangka panjang. Pendekatan ini berimplikasi pada peningkatan efisiensi degradasi polutan, pengurangan risiko polusi sekunder, serta percepatan pemulihan kualitas lingkungan.

Kata Kunci: Bioremediasi, Pencemaran Lingkungan, Inovasi, *Systematic Literature Review*

ABSTRACT

The escalation of global environmental pollution caused by hydrocarbons, heavy metals, and emerging pollutants demands sustainable remediation solutions given the limitations of conventional physical and chemical methods. Bioremediation emerges as an eco-friendly alternative, but findings on its latest innovations remain fragmented across the literature without a comprehensive study evaluating the combined effectiveness of these technologies. This study is a Systematic Literature Review (SLR) aimed at mapping the development of recent bioremediation innovations and evaluating the effectiveness of their hybrid technologies. The research method adopted the PRISMA protocol by searching the Scopus database (2020–2026), systematically screening and yielding 18 relevant journal articles for thematic analysis. The



literature synthesis reveals a paradigm shift in bioremediation from conventional approaches which tend to rely on single biological agents and isolated processes toward an integrated approach based on hybrid systems that combine indigenous microbes, bioavailability enhancement strategies, and modern engineering technologies. This shift is reflected in four main findings: (1) the exploration of local (indigenous) microbiome strains, (2) the utilization of bioavailability enhancers for pollutants, such as biosurfactants and quorum-sensing, (3) the hybridization of biological systems with modern engineering (e.g., CRISPR-Cas9 genome modification and Microbial Bioelectrochemical Systems), and (4) the identification of implementation challenges and the gap in adopting these technologies at the local level. The conclusion of this study confirms that the integration of these four cutting-edge innovations makes bioremediation one of the adaptive, efficient, and sustainable interventions in ecosystem restoration, thereby preventing long-term ecological damage. This approach has implications for increasing pollutant degradation efficiency, reducing the risk of secondary pollution, and accelerating the restoration of environmental quality.

Keywords: Bioremediation, Environmental Pollution, Innovation, Systematic Literature Review

PENDAHULUAN

Peningkatan aktivitas industrialisasi dan urbanisasi secara masif telah memicu peningkatan pencemaran tanah dan air pada tingkat global yang sangat mengkhawatirkan. Ekosistem kini terpapar akumulasi polutan kompleks, mulai dari hidrokarbon minyak bumi, logam berat beracun, hingga polutan baru (*emerging pollutants*) seperti residu farmasi dan herbisida yang lolos dari instalasi pengolahan limbah (Abushahab et al., 2024; Dell'Anno et al., 2023). Krisis pencemaran ini mencakup penurunan kualitas tanah dan air, gangguan keseimbangan ekosistem, serta ancaman terhadap kesehatan manusia. Penanganan krisis pencemaran akibat akumulasi polutan kompleks ini nyatanya terhambat oleh keterbatasan metode fisik dan kimiawi konvensional. Sebagai contoh, metode fisik seperti insinerasi (pembakaran limbah) dan pencucian tanah (*soil washing*), serta metode kimia seperti oksidasi kimia dan penggunaan pelarut, menuntut biaya tinggi, konsumsi energi yang masif, dan sering kali hanya memindahkan polutan ke fase lain yang justru memicu polusi sekunder (Dutta et al., 2022; Sagar & Priti, 2025). Kondisi ini mendesak komunitas ilmiah global untuk beralih pada alternatif intervensi yang tidak hanya efektif mengeliminasi polutan, tetapi juga menjamin stabilitas ekologi jangka panjang.

Sebagai respons atas keterbatasan metode konvensional tersebut, bioremediasi hadir sebagai solusi alternatif strategis. Secara ringkas, bioremediasi merupakan teknologi pemulihan lingkungan yang memanfaatkan organisme hidup, seperti mikroorganisme dan tanaman, untuk mendegradasi atau menetralkan polutan berbahaya. Secara fundamental, proses bioremediasi ini bekerja melalui agen biologis yang memproduksi enzim-enzim khusus untuk memodifikasi struktur polutan beracun menjadi metabolit yang tidak kompleks dan aman bagi lingkungan. Sebagai sebuah teknologi hijau, bioremediasi diimplementasikan melalui tiga pendekatan utama, yaitu fitoremediasi yang memanfaatkan sistem perakaran tanaman untuk menyerap kontaminan, bioaugmentasi melalui penambahan mikroorganisme spesifik, serta biostimulasi yang bertujuan meningkatkan aktivitas mikrob alami melalui penambahan nutrisi (Dewi et al., 2024).

Sehubungan dengan metode tersebut, Pemerintah Indonesia telah mempunyai payung hukum yang mengatur standar baku kegiatan bioremediasi dalam mengatasi permasalahan



lingkungan akibat pertambangan, perminyakan, serta bentuk pencemaran lainnya seperti logam berat dan pestisida. Aturan ini tertuang melalui Keputusan Menteri Lingkungan Hidup (Kepmen LH) No. 128 Tahun 2003 tentang tata cara dan persyaratan teknis pengelolaan limbah dan tanah terkontaminasi minyak bumi secara biologis yang secara tegas mencantumkan bahwa bioremediasi harus dilakukan dengan menggunakan mikroba lokal. Pendekatan bioremediasi berbasis mikroba lokal (indigen) yang didukung oleh regulasi ini menawarkan keunggulan komparatif karena sifatnya yang ramah lingkungan dan mampu menjaga keberlanjutan ekosistem tanpa merusak tatanan habitat aslinya (Agarwal & Rani, 2022; El-Liethy et al., 2022).

Seiring dengan meningkatnya kompleksitas pencemaran, riset inovasi bioremediasi kontemporer terus berkembang melampaui penggunaan agen biologis konvensional menuju teknologi pemulihan yang jauh lebih adaptif. Fokus penelitian saat ini banyak diarahkan pada pemanfaatan mikroba lokal (indigen) dari ekosistem ekstrem, mengingat mikroba asli ini memiliki daya adaptasi dan tingkat kelangsungan hidup yang jauh lebih superior di lingkungan tercemar dibandingkan mikroba luar. Selain itu, penelitian juga berfokus pada upaya mengatasi rendahnya tingkat ketersediaan polutan bagi mikroba (bioavailabilitas). Karena banyak polutan persisten bersifat sulit larut, mikroba kesulitan untuk menjangkau dan mengurainya. Oleh karena itu, diperlukan penambahan agen pemicu (*enhancers*) dan stimulan, seperti biosurfaktan, yang berfungsi memecah atau melarutkan polutan tersebut agar lebih mudah diserap dan didegradasi oleh mikroba (Futughe et al., 2023; Hu et al., 2025; Lara-Moreno et al., 2022). Lebih jauh, inovasi bioremediasi turut menghadirkan hibridisasi metode biologis dasar dengan instrumen rekayasa modern, seperti modifikasi genetika dan material rekayasa tingkat lanjut (penggunaan sistem bioelektrokimia hingga perangkat CRISPR-Cas9), yang kini menjadi garda terdepan untuk merespons polusi campuran secara terpadu dan sinergis (Agarwal & Rani, 2022; Ambaye et al., 2023).

Berbagai literatur terbaru menunjukkan adanya perkembangan inovasi yang pesat di bidang bioremediasi. Namun, temuan-temuan inovatif ini pada praktiknya masih tersebar dalam berbagai publikasi akademik yang membahas kasus pencemaran secara terpisah. Selain itu, kajian ilmiah menyeluruh yang merangkum dan mengevaluasi efektivitas gabungan teknologi baru tersebut masih sangat terbatas. Oleh karena itu, *Systematic Literature Review* (SLR) ini bertujuan untuk memetakan perkembangan inovasi bioremediasi terbaru, mengevaluasi efektivitas gabungan (hibridisasi) teknologinya, serta merumuskan panduan ilmiah untuk mendukung keberhasilan praktik pemulihan lingkungan secara global. Mengingat literatur yang masih terfragmentasi, penggunaan metode SLR menjadi sangat urgen untuk merangkum dan menganalisis temuan-temuan tersebut secara komprehensif. Penelitian ini memiliki empat pertanyaan penelitian (*research question*) sebagai berikut:

1. RQ1: Bagaimana perkembangan pemanfaatan mikroba lokal (indigen) dan kemampuannya beradaptasi dalam mengatasi polutan di lingkungan yang ekstrem?
2. RQ2: Strategi apa saja yang efektif untuk meningkatkan ketersediaan polutan bagi mikroba (bioavailabilitas) melalui penggunaan agen pemicu (*enhancers*) dan stimulan?
3. RQ3: Bagaimana bentuk penggabungan (hibridisasi) antara agen biologis dengan teknologi rekayasa modern dalam mengoptimalkan pemulihan lingkungan?
4. RQ4: Apa saja tantangan penerapan inovasi bioremediasi saat ini dan bagaimana arah penelitian ke depannya untuk mengatasi ketertinggalan teknologi di tingkat lokal?



METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) yang berpedoman pada protokol *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) untuk memastikan proses identifikasi, seleksi, dan sintesis literatur berjalan secara transparan dan sistematis. Pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran pada pangkalan data akademik bereputasi tinggi, yaitu Scopus untuk menjangkau artikel-artikel studi primer terkini yang relevan dengan topik inovasi bioremediasi. Strategi pencarian awal dibangun menggunakan kombinasi kata kunci spesifik dan operator Boolean guna menangkap tiga variabel utama kajian: bioremediasi, inovasi, dan pencemaran lingkungan. *Query* pencarian yang dimasukkan ke dalam mesin pencari Scopus adalah ("bioremediation" OR "phytoremediation" OR "microbial remediation") AND ("innovat*" OR "novel" OR "advance*" OR "emerg*") AND ("pollut*" OR "contaminat*" OR "environmental"). Berdasarkan penelusuran awal menggunakan *query* tersebut, ditemukan sebanyak 298 dokumen yang berpotensi relevan untuk dikaji.

Kemudian, untuk memastikan relevansi dan kebaruan literatur, dilakukan serangkaian kriteria inklusi dan eksklusi secara bertahap. Tahapan protokol PRISMA yang dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Identification (Identifikasi)

Tahap awal pencarian di pangkalan data Scopus berhasil mengidentifikasi 298 dokumen yang berpotensi relevan berdasarkan kata kunci yang ditetapkan.

2. Screening (Penyaringan)

Pada kriteria inklusi, tahapannya adalah membatasi rentang waktu publikasi hanya pada terbitan tujuh tahun terakhir (2020 hingga 2026), yang mereduksi jumlah literatur menjadi 221 dokumen. Selanjutnya, pencarian dipersempit berdasarkan area subjek keilmuan (*subject area*) pada bidang *Environmental Science* serta *Biochemistry, Genetics and Molecular Biology*, yang menyisakan 169 dokumen. Pada tahap eksklusi, tahapannya adalah mengeksklusi format non-primer seperti bab buku (*Book chapter*) dan jenis ulasan (*Reviews*), serta artikel yang berstatus *in press*. Dokumen yang dipertahankan hanyalah artikel penelitian studi primer (*Article*) yang telah berada pada tahap publikasi akhir (*Final*), sehingga hasil menyusut menjadi 71 dokumen.

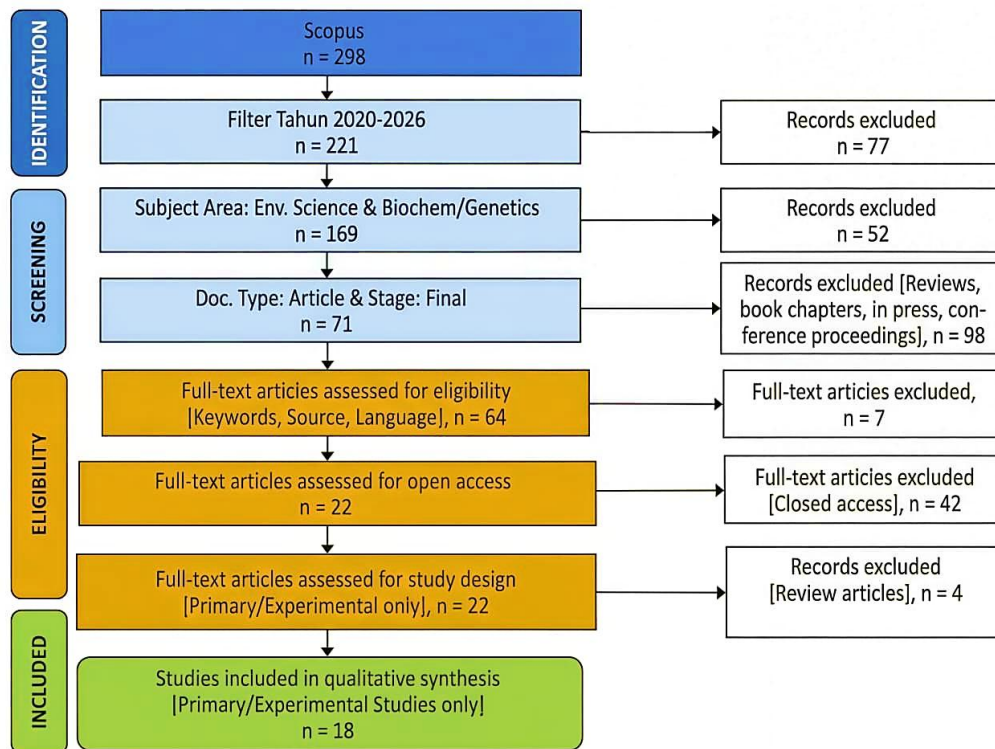
3. Eligibility (Penilaian Kelayakan)

Kriteria inklusi tambahan diterapkan terkait sumber dan aksesibilitas publikasi. Penelusuran dibatasi hanya pada literatur dari jurnal akademik (*Journal*), ditulis dalam bahasa Inggris (*English*), dan berstatus akses terbuka (*All open access*). Filter ini menghasilkan 22 artikel yang dapat dilakukan penelaahan naskah secara utuh (*full-text review*). Penelaahan teks lengkap mendalam terhadap 22 artikel tersebut mendeteksi adanya 4 artikel yang dikategorikan sebagai tinjauan literatur yang kemudian turut dieksklusi karena tidak menyajikan data primer untuk sintesis kualitatif.

4. Included (Inklusi)

Melalui seluruh rangkaian seleksi sistematis ini, diperoleh hasil akhir berupa 18 artikel jurnal studi primer yang memenuhi semua kriteria inklusi. Ke-18 artikel inilah yang dilibatkan secara final untuk tahapan ekstraksi data.

Rincian lengkap mengenai alur seleksi literatur dari tahap identifikasi hingga diperoleh 18 artikel final yang diinklusi untuk analisis kualitatif dapat dilihat pada Gambar 1 terkait diagram Alir PRISMA yang menggambarkan proses identifikasi, penyaringan, penilaian kelayakan, dan inklusi literatur dari pangkalan data Scopus.



Gambar 1. Diagram Alir PRISMA Proses Seleksi Literatur

Teknik analisis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis tematik kualitatif (*qualitative thematic analysis*). Setelah 18 artikel utama terpilih melalui panduan PRISMA, proses ekstraksi data dilakukan menggunakan instrumen matriks sintesis. Informasi yang dikumpulkan dari setiap artikel meliputi: identitas penulis dan tahun terbit, jenis agen biologis atau teknologi gabungan yang digunakan, target polutan spesifik, serta temuan utama terkait efektivitas pemulihan. Data yang telah terkumpul kemudian dikelompokkan dan dianalisis berdasarkan empat pertanyaan penelitian, yaitu: (1) dinamika inovasi mikroba lokal (indigen), (2) strategi peningkatan ketersediaan polutan (bioavailabilitas), (3) penerapan sinergi teknologi hibrida, dan (4) tantangan implementasi serta arah riset ke depan. Hasil pengelompokan tema ini selanjutnya disusun secara naratif untuk menjawab seluruh pertanyaan penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Pelaksanaan seleksi literatur secara sistematis melalui protokol PRISMA menetapkan 18 artikel jurnal yang memenuhi kriteria inklusi untuk dianalisis secara mendalam. Kumpulan literatur terpilih ini merepresentasikan tren mutakhir penelitian inovasi bioremediasi global dalam rentang waktu terbitan terbaru. Fokus kajian dari seluruh artikel tersebut terdistribusi pada penanganan tiga kategori utama polutan persisten, yakni hidrokarbon dan minyak bumi, akumulasi logam berat beracun, serta kelompok polutan baru (*emerging pollutants*) seperti residu herbisida dan pewarna industri.

Pemetaan temuan dari ke-18 literatur tersebut merefleksikan pergeseran paradigma yang signifikan menuju pendekatan bioremediasi yang lebih adaptif dan terintegrasi. Inovasi-

inovasi utama yang berhasil diidentifikasi mencakup penemuan galur (*strain*) mikrobioma indigen berkinerja tinggi dari lingkungan ekstrem, eksploitasi agen pemicu bioavailabilitas (*enhancers*) seperti biosurfaktan dan molekul *quorum-sensing*, hingga hibridisasi metode biologis dengan instrumen rekayasa material serta genetika tingkat lanjut. Hasil analisis 18 literatur yang dikaji disajikan secara terperinci pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Analisis 18 Literatur yang Dikaji

No	Penulis dan Tahun	Agen Biologis/ Teknologi Hibrida	Target Polutan	Temuan Utama/ Efisiensi dan Inovasi
1	Sun et al. (2025)	Bakteri <i>Bacillus</i> B3	Pirena (PAH)	Degradasi pirena hingga 82% dalam 12 hari melalui penemuan jalur ftalat baru dan sekresi biosurfaktan.
2	Hu et al. (2025)	Mikroba + Quorum-Sensing & DMSP	Minyak (Sedimen laut dalam)	Molekul quorum-sensing dan DMSP secara signifikan memicu aktivitas metabolisme mikroba dalam kondisi ekstrem (suhu rendah, tekanan tinggi).
3	Yani et al. (2025)	Bakteri indigen <i>Bacillus albus</i>	Kadmium (Cd)	Isolat indigen dari Danau Tempe terbukti mampu mereduksi konsentrasi logam berat Cd hingga 68,93%.
4	Qiao et al. (2024)	<i>Pseudomonas zhaodongensis</i> + DMSP	Minyak (Sedimen laut dalam)	Penambahan agen DMSP secara efektif meningkatkan kapasitas degradasi hidrokarbon pada lingkungan mikrokosmos laut dalam.
5	Majewska et al. (2024)	Bakteri penghasil Siderofor	Logam berat (Al, Cd, Co, Cu, dll.)	Isolat asal tanah Spitsbergen terbukti mengeksudasi siderofor yang secara spesifik mengkhelat logam berat non-besi.
6	Abushaha b et al. (2024)	Enzim DyP Termofilik dari fungi <i>Pleurotus sapidus</i>	Pewarna membandel (<i>Emerging pollutants</i>)	Enzim peroksidase tahan panas (termofilik) menawarkan dekolonisasi pewarna polutan organik secara cepat dan ramah lingkungan.
7	Futughe et al. (2023)	Solarisasi + Fitoremediasi (<i>C. odorata</i>) + Biosurfaktan	PAH	Penggabungan ketiga metode menurunkan kadar phenanthrene, fluoranthene, dan benzo(a)pyrene secara signifikan di tanah.
8	Ma et al. (2023)	Konsorsium Bakteri toleran Cd (<i>P. nitroguajacolicus</i> , <i>L. fusiformis</i> , dll.)	Kadmium (Cd) di tanah	Penambahan strain unggul meningkatkan kelimpahan mikroba untung dan meregulasi aktivitas enzim tanah secara positif.
9	Zhou et al. (2023)	Resuscitation Promoting Factor (Rpf)	PCBs	Rpf berhasil mengaktifkan kembali bakteri VBNC (<i>viable but non-culturable</i>) yang tertidur, mempercepat degradasi PCBs secara masif.

No	Penulis dan Tahun	Agen Biologis/ Teknologi Hibrida	Target Polutan	Temuan Utama/ Efisiensi dan Inovasi
10	Dell'Anno et al. (2023)	Pengayaan Mikrobioma sedimen laut	Hidrokarbon minyak & Logam berat	Eksplorasi genetik mengungkap strain bakteri laut baru yang memiliki fungsi ganda dalam remediasi minyak dan logam.
11	El-Liethy et al. (2022)	<i>Enterobacter hormaechei</i> ODB H32 + Biostimulasi	Minyak mentah (<i>Crude oil</i>)	Stimulasi menggunakan sumber nitrogen mengoptimalkan efisiensi biodegradasi minyak mentah oleh isolat spesifik.
12	Lara-Moreno et al. (2022)	Bioaugmentasi bakteri + Siklodekstrin	Herbisida (Trifluralin)	Siklodekstrin berfungsi krusial sebagai agen peningkat ketersediaan hayati (<i>bioavailability</i>) untuk mendobrak kelarutan polutan.
13	Gogoi et al. (2022)	<i>Pseudomonas otitidis</i> DU13 + Biosurfaktan	Oli motor di tanah dan perairan	Produksi biosurfaktan mereduksi tegangan permukaan cairan secara drastis, meningkatkan emulsifikasi terhadap sisa oli.
14	Alhefeiti et al. (2021)	<i>Bacillus cereus</i> MA1	Polutan aromatik & <i>Emerging pollutants</i>	Isolat lumpur minyak terbukti handal mendekolorisasi pewarna aromatik dan mendegradasi residu obat dalam kondisi aerobik.
15	Turcios et al. (2021)	Fitoremediasi (<i>Tripolium pannonicum</i>)	<i>Emerging pollutants</i> di estuari	Pembuktian kemampuan tanaman halofit dalam menyerap polutan baru pada lingkungan bersalininitas (estuari).
16	Golani & Hajela (2020)	<i>Staphylococcus argenteus</i> MG2 + Biostimulasi	Minyak diesel	Kombinasi bioaugmentasi galur baru lokal dan biostimulasi memberikan efektivitas pemulihan tertinggi pada tanah.
17	Catania et al. (2020)	Biofilm biosorbent dari polimer terurai (PLA/PCL)	Tumpahan minyak di air	Matriks ramah lingkungan menyediakan platform ideal bagi bakteri hydrocarbonoclastic untuk tumbuh dan mendegradasi minyak.
18	Heidari & Panico (2020)	Galur <i>Bacillus</i> sp. (Q3 dan Q5)	Pb (II) dan Cd (II) (Logam Berat)	Mekanisme sorpsi biologi yang dioptimasi menggunakan RSM memberikan tingkat penyisihan yang sangat efisien untuk timbal dan kadmium.

Pembahasan

1. Dinamika Inovasi Mikroba Indigen dan Mekanisme Adaptasi Ekstrem

Eksplorasi galur mikrobioma indigen mendominasi tren mutakhir dalam riset bioremediasi, menggeser ketergantungan pada konsorsium mikroba komersial yang sering kali gagal beradaptasi di lapangan. Isolat asli dari lokasi tercemar terbukti memiliki memori genetik yang memungkinkan mereka bertahan dari toksisitas tingkat tinggi. Bakteri *Bacillus albus* yang



diisolasi langsung dari Danau Tempe memperlihatkan kemampuan luar biasa dalam mereduksi kadar kadmium (Cd) hingga 68,93% di ekosistem perairan tawar (Yani et al., 2025). Kasus pencemaran tumpahan minyak pelumas dan solar di tanah juga berhasil diatasi dengan tingkat efisiensi pemulihan tertinggi melalui bioaugmentasi galur lokal *Pseudomonas otitidis* DU13 (Gogoi et al., 2022) dan *Staphylococcus argenteus* MG2 (Golani & Hajela, 2020). Penggunaan galur *Bacillus cereus* MA1 yang diisolasi dari lumpur minyak memberikan hasil signifikan dalam mendekolorisasi polutan aromatik membandel dan residu obat-obatan secara simultan (Alhefeiti et al., 2021).

Lingkungan ekstrem menuntut evolusi jalur metabolik baru yang membuka peluang besar bagi inovasi bioremediasi. Galur *Bacillus* B3 memecahkan kebuntuan degradasi hidrokarbon polisiklik aromatik (PAH) dengan mengurai pirena hingga 82% melalui penemuan modifikasi jalur ftalat yang unik (Sun et al., 2025). Ekosistem laut dalam yang memiliki tekanan hidrostatik tinggi dan suhu rendah menyimpan agen tangguh seperti *Pseudomonas zhaodongensis* dan mikrobioma sedimen laut yang dikarakterisasi mampu melakukan fungsi ganda dalam remediasi minyak sekaligus logam berat (Dell'Anno et al., 2023; Qiao et al., 2024). Inovasi degradasi biologis turut merambah penggunaan jamur melalui isolasi enzim peroksidase (DyP) termofilik dari *Pleurotus sapidus* yang menawarkan pemecahan polutan organik persisten di bawah tekanan suhu ekstrem yang tidak mampu ditoleransi oleh bakteri biasa (Abushahab et al., 2024).

2. Strategi Meningkatkan Bioavailabilitas: Peran *Enhancers* dan Stimulan

Hambatan utama berupa rendahnya ketersediaan hayati (*bioavailability*) polutan hidrofobik seperti hidrokarbon dan pestisida secara konsisten dipecahkan melalui eksploitasi agen pemicu aktivitas. Biosurfaktan disekresikan secara alami oleh berbagai galur unggul untuk menurunkan tegangan permukaan cairan, sehingga molekul polutan terdispersi dan mudah dijangkau oleh enzim pemecah (Futughe et al., 2023; Gogoi et al., 2022; Sun et al., 2025). Aplikasi molekul siklodekstrin pada area pertanian yang terpapar herbisida persisten menunjukkan fungsi krusial sebagai agen enkapsulasi yang secara drastis mendobrak kelarutan polutan (Lara-Moreno et al., 2022). Mekanisme pertahanan seluler turut dioptimalkan dalam penanganan logam berat melalui eksudasi senyawa siderofor oleh mikrobioma asal tanah Spitsbergen yang secara spesifik mengkhelat logam non-besi agar tidak meracuni sel utama (Majewska et al., 2024). Keberhasilan mekanisme sorpsi biologis ini juga divalidasi pada reduksi timbal dan kadmium menggunakan galur *Bacillus* sp. yang dioptimasi dengan pendekatan *Response Surface Methodology* (Heidari & Panico, 2020).

Manipulasi komunikasi seluler dan siklus dormansi mikroba melahirkan lompatan bioteknologi yang sangat revolusioner dalam beberapa tahun terakhir. Penambahan molekul stimulasi *quorum-sensing* dan *dimethylsulfoniopropionate* (DMSP) ke dalam sedimen laut terbukti secara mutlak memicu aktivitas metabolisme komunal mikroba pendegradasi minyak mentah pada kondisi abisal (Hu et al., 2025; Qiao et al., 2024). Inovasi pada level seluler juga ditunjukkan melalui ekstraksi *Resuscitation Promoting Factor* (Rpf) yang disuntikkan ke dalam tanah tercemar *Polychlorinated biphenyls* (PCBs). Protein pemicu ini bekerja secara presisi untuk "membangunkan" kembali populasi bakteri pendegradasi yang sebelumnya terjebak dalam fase tertidur atau *viable but non-culturable* (VBNC), sehingga proses bioremediasi kembali berjalan agresif (Zhou et al., 2023).

3. Sinergi Hibrid: Integrasi Biologi dengan Rekayasa Modern

Integrasi sistem biologis ke dalam instalasi rekayasa material dan perlakuan fisik menciptakan efek sinergis yang melipatgandakan kecepatan pemulihan ekosistem.



Penggabungan perlakuan solarisasi termal dengan metode fitoremediasi yang diperkuat oleh inokulasi biosurfaktan memfasilitasi dekontaminasi lahan beracun secara jauh lebih cepat dibandingkan perlakuan tunggal (Futughe et al., 2023). Disiplin fitoremediasi sendiri sedang mengalami transisi masif menuju level genetik melalui pendekatan *omics* dan modifikasi genom presisi seperti perangkat CRISPR-Cas9. Teknologi ini mendesain arsitektur tanaman hiperakumulator "cerdas" yang memiliki toleransi ekstrem terhadap polusi campuran di badan air (Agarwal & Rani, 2022). Peran krusial tanaman hiperakumulator murni tanpa modifikasi genetik juga tetap relevan, dibuktikan oleh efisiensi tanaman halofit dalam menyerap polutan baru pada lingkungan bersalinitas tinggi seperti estuari (Turcios et al., 2021).

Inovasi rekayasa perairan termutakhir menghadirkan platform intervensi yang mempertemukan ilmu material dan biokimia elektro. Matriks *biofilm biosorbent* yang dicetak dari polimer ramah lingkungan (PLA/PCL) sukses menyediakan media tempel yang sangat ideal bagi bakteri *hydrocarbonoclastic* untuk tumbuh dan mendegradasi matriks minyak di permukaan air secara stabil (Catania et al., 2020). Sistem Bioelektrokimia Mikroba (*Microbial Bioelectrochemical Systems/BES*) dirancang secara terpadu untuk mengeksploitasi aliran elektron bebas dari proses metabolisme mikroba pendegradasi. Alat rekayasa ini mampu mempercepat oksidasi limbah hidrokarbon sembari memanen energi listrik bersih secara berkelanjutan (Ambaye et al., 2023).

4. Tantangan Implementasi dan Arah Riset Masa Depan

Transisi teknologi bioremediasi dari skala laboratorium menuju aplikasi lapangan (*real-world application*) masih menghadapi berbagai rintangan. Curiel-Alegre et al. (2025) menegaskan bahwa meskipun bioremediasi menawarkan solusi yang menjanjikan, menerjemahkan keberhasilan dari skala laboratorium ke skala lapangan berskala besar sangatlah sulit karena adanya tantangan dalam mempertahankan kondisi lingkungan yang optimal dan menjaga ketersediaan nutrisi esensial bagi mikroba. Selain itu, Koolivand et al. (2024) dalam kajiannya menyoroti bahwa konsorsium mikroba buatan (bioaugmentasi) sering kali mengalami kegagalan saat diaplikasikan dalam skala besar karena mikroorganisme yang diintroduksi kesulitan bertahan hidup dan bersaing dengan mikrobioma asli tanah di bawah kondisi cuaca yang ekstrem. Oleh karena itu, sangat diperlukan formulasi bakteri pendegradasi yang dipadukan dengan agen biostimulasi, imobilisasi menggunakan bahan pembawa pelindung seperti biochar, serta penyusunan standar operasional baku (SOP). Standar ini mutlak diperlukan untuk memastikan bahwa proses penguraian polutan organik di alam bebas tidak justru menghasilkan senyawa turunan yang lebih beracun.

Tinjauan sistematis ini menyoroti adanya kesenjangan (*gap*) penerapan teknologi bioremediasi antara tren global dan kondisi di Indonesia. Penelitian di tingkat global telah melesat jauh dengan menggunakan teknologi hibrida yang canggih, seperti rekayasa genetika, penambahan agen pemicu (*enhancers*) molekuler, dan perakitan sistem bioelektrokimia. Sebaliknya, adopsi teknologi mutakhir tersebut di Indonesia masih terpantau sangat minim. Dari 18 literatur utama yang dikaji, hanya terdapat satu penelitian yang mengaplikasikan inovasi bioremediasi secara langsung di Indonesia, yaitu pemanfaatan bakteri lokal (*Bacillus albus*) dari Danau Tempe untuk menurunkan racun logam kadmium di perairan. Kondisi ini memperlihatkan bahwa penerapan rekayasa bioremediasi tingkat lanjut di dalam negeri belum sepenuhnya sejalan dengan laju inovasi global. Terkait potensi solusi untuk ketertinggalan ini, Isnada dan Hala (2026) mengemukakan bahwa galur berbasis *Pseudomonas aeruginosa* hasil rekayasa genetik memiliki potensi yang sangat signifikan untuk dikembangkan. Inovasi rekayasa genetika tersebut dinilai sangat krusial untuk diaplikasikan di Indonesia, khususnya



menghadapi daerah-daerah tercemar yang memiliki kondisi ekstrem seperti salinitas tinggi, pH yang berfluktuasi, serta konsentrasi minyak yang pekat.

Kenyataan tersebut sekaligus membuka peluang riset yang sangat luas bagi para peneliti nasional di masa depan. Adaptasi inovasi baru, seperti penggunaan agen pemicu kelarutan polutan dan rekayasa material mutakhir, sangat krusial untuk mulai diterapkan pada program pemulihan ekosistem lokal guna merespons tingginya kasus pencemaran akibat limbah pertambangan, perminyakan, maupun insiden lingkungan di tanah air. Sebagai contoh nyata penerapan intervensi di tingkat lokal, Sulistiyaningrum et al. (2026) telah membuktikan efektivitas bioremediasi dalam memulihkan tanah yang terkontaminasi oleh tumpahan lumpur Lapindo di Desa Glagaharum dan Gedang, Sidoarjo, Jawa Timur. Penelitian tersebut berhasil memanfaatkan *eco-enzyme* sebagai agen pemulih untuk menyisihkan kandungan *total petroleum hydrocarbon* (TPH) secara signifikan dari sampel tanah terdampak. Secara keseluruhan, keberhasilan bioremediasi di masa depan akan sangat bergantung pada kemampuan peneliti dalam mengintegrasikan mikroba lokal, agen pemicu kimiawi, bahan pembawa pelindung, dan teknologi rekayasa modern ke dalam satu sistem pemulihan yang utuh dan tepat guna.

KESIMPULAN

Tinjauan literatur sistematis terhadap 18 publikasi menunjukkan bahwa teknologi bioremediasi telah mengalami pergeseran paradigma dari pendekatan biologis konvensional menuju sistem rekayasa hibrida yang lebih terintegrasi dan presisi. Berdasarkan hasil analisis, terdapat empat kesimpulan utama. Pertama, pemanfaatan mikroba lokal (indigen) terbukti memiliki kemampuan adaptasi yang tinggi dalam mendegradasi polutan persisten di lingkungan yang ekstrem. Kedua, kendala rendahnya ketersediaan polutan bagi mikroba (*bioavailabilitas*) berhasil diatasi secara efektif melalui penggunaan agen pemicu (*enhancers*) seperti biosurfaktan, siklodekstrin, siderofor, dan stimulasi *quorum-sensing*. Ketiga, sinergi antara sistem biologis dengan teknologi rekayasa modern seperti modifikasi genetika, matriks *biofilm biosorbent*, dan sistem bioelektrokimia mikroba mampu melipatgandakan efisiensi pemulihan lingkungan. Keempat, di balik pesatnya inovasi global tersebut, masih terdapat tantangan berupa kesenjangan penerapan teknologi di tingkat lokal, khususnya di Indonesia. Oleh karena itu, kondisi ini membuka peluang riset yang luas untuk mengembangkan bioremediasi berbasis mikroba lokal yang dipadukan dengan teknologi hibrida mutakhir, guna mewujudkan praktik restorasi ekosistem yang adaptif, efisien, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abushahab, M. K., Alsadik, A., Al-Maqdi, K. A., Athamneh, K., Alharthi, T., Almesmari, Z., Abdalla, A. S., Alaleeli, A. M., Shah, I., & Ashraf, S. S. (2024). Thermophilic bioremediation of recalcitrant emerging pollutants: A novel application of the fungal DyP from *Pleurotus sapidus*. *Environmental Technology and Innovation*, 33, 103543. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103543>
- Agarwal, P., & Rani, R. (2022). Strategic management of contaminated water bodies: Omics, genome-editing and other recent advances in phytoremediation. *Environmental Technology and Innovation*, 27, 102463. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102463>
- Alhefeiti, M. A., Athamneh, K., Vijayan, R., & Ashraf, S. S. (2021). Bioremediation of various aromatic and emerging pollutants by *Bacillus cereus* sp. isolated from petroleum sludge.



- Water Science and Technology*, 83(7), 1535-1547.
<https://doi.org/10.2166/wst.2021.065>
- Ambaye, T., Vaccari, M., Franzetti, A., Prasad, S., Formicola, F., Rosatelli, A., Hassani, A., Aminabhavi, T. M., & Rtimi, S. (2023). Microbial electrochemical bioremediation of petroleum hydrocarbons (PHCs) pollution: Recent advances and outlook. *Chemical Engineering Journal*, 452, 139372. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139372>
- Azab El-Liethy, M. A., El-Noubi, M. M., Abia, A. L. K., El-Malky, M. G., Hashem, A. I., & El-Taweel, G. E. (2022). Eco-friendly bioremediation approach for crude oil-polluted soils using a novel and biostimulated *Enterobacter hormaechei* ODB H32 strain. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(11), 10577-10588. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03885-z>
- Catania, V., Lopresti, F., Cappello, S., Scaffaro, R., & Quatrini, P. (2020). Innovative, ecofriendly biosorbent-biodegrading biofilms for bioremediation of oil- contaminated water. *New Biotechnology*, 58, 25-31. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.04.001>
- Curiel-Alegre, S., Ali Khan, A. H., Rad, C., Velasco-Arroyo, B., Rumbo, C., Rivilla, R., Durán, D., Redondo-Nieto, M., Borràs, E., Molognoni, D., Martín-Castellote, S., Juez, B., & Barros, R. (2025). Bioaugmentation and vermicompost facilitated the hydrocarbon bioremediation: Scaling up from lab to field for petroleum-contaminated soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(28), 16601–16616. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32916-8>
- Dell'Anno, F., Joaquim van Zyl, L., Trindade, M., Buschi, E., Cannavacciuolo, A., Pepi, M., Sansone, C., Brunet, C., Ianora, A., de Pascale, D., Golyshin, P. N., Dell'Anno, A., & Rastelli, E. (2023). Microbiome enrichment from contaminated marine sediments unveils novel bacterial strains for petroleum hydrocarbon and heavy metal bioremediation. *Environmental Pollution*, 317, 120772. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120772>
- Dewi, E. R. S., Nurwahyunani, A., Sari, E. L., Nissa, F. K., Septiana, M. A., Andriani, D. R. P., & Azuhro, V. (2024). Teknik bioremediasi sebagai solusi dalam upaya pengendalian pencemaran lingkungan: Literatur review. *HUMANITIS: Jurnal Humaniora, Sosial dan Bisnis*, 2(1), 124-135. <http://humanisa.my.id/index.php/hms/article/view/89>
- Dutta, N., Usman, M., Ashraf, M. A., Luo, G., & Zhang, S. (2022). Efficacy of emerging technologies in addressing reductive dechlorination for environmental bioremediation: A review. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 3, 100065. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2022.100065>
- Futughe, A. E., Jones, H., & Purchase, D. (2023). A novel technology of solarization and phytoremediation enhanced with biosurfactant for the sustainable treatment of PAH-contaminated soil. *Environmental Geochemistry and Health*, 45(6), 3847-3863. <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01460-0>
- Gogoi, B., Das, I., Gogoi, M., Charingia, D., Bandyopadhyay, T., & Borah, D. (2022). Bioremediation of motor oil-contaminated soil and water by a novel indigenous *Pseudomonas otitidis* strain DU13 and characterization of its biosurfactant. *3 Biotech*, 12(3), 68. <https://doi.org/10.1007/s13205-022-03133-2>
- Golani, M., & Hajela, K. (2020). Bioremediation of diesel oil contaminated soil by a novel isolated potential oil degrading *Staphylococcus argenteus* MG2 bacteria using biostimulation method. *Nature Environment and Pollution Technology*, 19(4), 1567-1576. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2020.v19i04.023>



- Heidari, P., & Panico, A. (2020). Sorption Mechanism and Optimization Study for the Bioremediation of Pb(II) and Cd(II) Contamination by Two Novel Isolated Strains Q3 and Q5 of Bacillus sp. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11), 1-20. <https://doi.org/10.3390/ijerph17114059>
- Hu, S., Li, S., Wang, L., Wang, S., Cheng, D., Xue, J., Gao, Y., Lin, S., Li, C., Qiao, Y., & Liu, Y. (2025). Novel insights into quorum-sensing microbe combined with dimethylsulfoniopropionate enhancing bioremediation of oil-contaminated sediment under typical deep-sea conditions: The performances and molecular mechanisms. *Marine Pollution Bulletin*, 220, 118356. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118356>
- Isnada, I., & Hala, Y. (2026). Optimalisasi Bioremediasi Minyak Bumi Menggunakan Pseudomonas Aeruginosa Hasil Rekayasa Genetik. *Venn: Journal of Sustainable Innovation on Education, Mathematics and Natural Sciences*, 5(2), 323–331. <https://doi.org/10.53696/venn.v5i2.392>
- Koolivand, A., Coulon, F., Ball, A. S., Ismail, N. I., Khudur, L. S., ParsiMehr, M., Gao, G., & Godini, K. (2024). Challenges with bioaugmentation and field-scale application of bioremediation processes for petroleum-contaminated sites: A review. *Indian Journal of Microbiology*, 64, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s12088-024-01408-1>
- Lara-Moreno, A., Morillo, E., Merchán, F., Madrid, F., & Villaverde, J. (2022). Bioremediation of a trifluralin contaminated soil using bioaugmentation with novel isolated bacterial strains and cyclodextrin. *Science of the Total Environment*, 840, 156695. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156695>
- Ma, B., Song, W., Zhang, X., Chen, M., Li, J., Yang, X., & Zhang, L. (2023). Potential application of novel cadmium-tolerant bacteria in bioremediation of Cd-contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 255, 114766. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114766>
- Majewska, M., Słomka, A., & Hanaka, A. (2024). Siderophore-producing bacteria from Spitsbergen soils—novel agents assisted in bioremediation of the metal-polluted soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(22), 32371-32381. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33356-0>
- Menteri Negara Lingkungan Hidup Republik Indonesia. (2003). *Keputusan menteri negara lingkungan hidup nomor 128 tahun 2003 tentang tata cara dan persyaratan teknis pengolahan limbah minyak bumi dan tanah terkontaminasi oleh minyak bumi secara biologis*.
- Qiao, Y., Xu, W., Wei, J., Kong, L., Xue, J., Jiang, Q., Cheng, D., & Liu, Y. (2024). Novel agents consisting of Pseudomonas zhaodongensis and dimethylsulfoniopropionate (DMSP) enhancing bioremediation of oil-contaminated sediments at deep-sea condition. *Environmental Technology and Innovation*, 36, 103744. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103744>
- Sagar, K., & Priti, K. (2025). Advanced approaches for bioremediation of emerging pollutants: Development of a sustainable and green environment. *Environment Conservation Journal*, 26(3), 1001-1021. <https://doi.org/10.36953/ECJ.32483067>
- Sulistiyaningrum, D. R., Rumhayati, B., & Srihardyastutie, A. (2026). Bioremediation of the Lapindo mud contaminated soil using eco-enzyme: Case of a total petroleum hydrocarbon removal. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 13(1), 9659–9668. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2026.131.9659>



- Sun, W., Yang, H., Rao, R., Zhang, L., Ke, C., Wang, S., & Zhang, Q. (2025). Bacillus B3 degrades pyrene in oil-contaminated soil via a novel phthalate pathway and efficient bioremediation. *Environmental Technology and Innovation*, 40, 104509. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104509>
- Turcios, A. E., Hielscher, M., Duarte, B., Fonseca, V. F., Caçador, I., & Papenbrock, J. (2021). Screening of emerging pollutants (Eps) in estuarine water and phytoremediation capacity of tripolium pannonicum under controlled conditions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(3), 1-17. <https://doi.org/10.3390/ijerph18030943>
- Yani, A., Hutasoit, L. R., Rohman, F., Irfandi, R., Rijal, S., Jayanegara, A., & Amin, A. M. (2025). Bioremediation of cadmium polluted water using a novel indigenous bacteria Bacillus albus Isolated from Tempe Lake, Indonesia. *Applied Water Science*, 15(9), 238. <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02599-8>
- Zhou, X., Zhang, S., Wang, R., An, Z., Sun, F., Shen, C., Lin, H., & Su, X. (2023). A novel strategy for enhancing bioremediation of polychlorinated biphenyl-contaminated soil with resuscitation promoting factor and resuscitated strain. *Journal of Hazardous Materials*, 447, 130781. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130781>